第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

内蒙古各气候区主要作物生长季干旱特征及其与响应因子回归模型

高晓瑜[1]， 汤鹏程[2]， 张 莎[1]， 屈忠义[1]， 杨 威[1]

（1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010020）

摘 要：全球气候变化环境下，内蒙古各气候区出现不同程度的干旱，可能会对当地农牧业带来一定的灾害损失。为了明确内蒙古地区主要作物生长季（5—9月）干旱特征及其对气候因子的响应，将内蒙古全区划分为5个气候区，选取1981—2012年内蒙古地区46个气象站点和2014—2020年20个气象站点逐月气象观测数据，计算了多尺度标准化降水蒸散指数（Standardized Precipitation Evaporation Index，SPEI），揭示其干旱特征规律；以月尺度为例，探明了各气候区作物生育期干旱高发时间与地区，干旱的气象主导因子，验证回归模型的适用性。结果表明：（1）从时间变化来看，1998—2008年干旱情况较为严重，其余年份干旱程度较轻；（2）作物生长季内干旱面积和程度最大为5月；西部特干旱气候区发生中度干旱的概率比东部湿润半湿润气候区高37%，而特大干旱主要发生在东部湿润半湿润气候区；（3）各气候区同一月份干旱气象主导因子各不相同，降水和最低温度是作物生长季干旱的最主要影响因子；（4）各气候区估算模型精度较高，误差在合理范围内，因此，回归模型可以用于有限气象数据下估算月SPEI。研究结果可为科学评估内蒙古地区作物生长季干旱特征及其制定合理干旱应对措施提供科学依据。

关键词：气候区；干旱特征；标准化降水蒸发指数；气象因子；回归模型；主要作物生长季；内蒙古

在全球变暖背景下，水分平衡变化直接改变了土壤表面湿润程度，也间接导致了气象灾害的发生，进而引起作物减产、生态环境恶化等问题[1-2]。在中国也表现得非常明显，尤其是北方地区[3]。内蒙古地区东西跨度较大，大部分地区对气象因子变化较敏感，干旱的发生对内蒙古地区的草原和农业系统生态环境及经济发展均会产生严重的影响。频次高、持续时间长的干旱对内蒙古各气候区作物生长发育造成严重损失，甚至影响粮食安全[4]。因此，研究作物生长期干旱的分布特征，对该地区干旱的评估及其对粮食安全的影响具有重要意义。

干旱的研究多依赖于干旱指数或湿润指数，如标准化降水指数（Standard Precipitation Index, SPI）[5]、降水距平百分率（Precipitation Anomaly Percentage, PA）[6]、帕尔默干旱指数（Palmer Drought Severity Index, PDSI）[7]和标准化降水蒸散指数（Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI）[8]；SPI方法仅考虑了降水的作用，但其并非唯一因素，具有一定的局限性[9-10]。PA方法将复杂的干旱现象归结于单一的原因，未能反映干旱的机理[11]；朱烨等[12-13]在中国区域用PDSI方法进行旱情评估，但PDSI适用于长期干旱，对短期干旱难以评估。

SPEI方法能综合考虑降水和蒸散的作用，且能基于多时间尺度内合理评估干旱[14]。研究表明，基于Penman-Monteith公式得到的SPEI更能合理地描述中国北方地区干湿变化特征[15]。已有学者利用SPEI评价了中国部分区域包括内蒙古地区的干旱时空格局特征。庄少伟等[16]对比了SPI和湿润指数H，对SPEI方法在中国区域的应用情况进行了分析；刘宇等[17]采用SPEI方法，发现渭北黄土台塬区春季干旱演变对年干旱的贡献率最大；张煦庭等[18]利用SPEI方法，分析了内蒙古干旱时空特征，明确

收稿日期：2022-04-11； **修订日期：**2022-06-27
基金项目：内蒙古自治区自然科学基金（2022MS05047，2020MS05011）；内蒙古自治区科技成果转化项目（2021CG0022）
作者简介：高晓瑜（1988-），女，讲师，主要从事多尺度农业水循环及用水效率研究. E-mail: gaoxiaoyu000@163.com
通讯作者：屈忠义. E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

了其对气候变化的响应。关于内蒙古地区的干旱研究多侧重于某一点或整个区域的干旱特征,对不同气候区作物生长季的干旱及其气象驱动因子涉及较少,而厘清作物生长季干旱及其驱动因子,对指导实际农牧业生产具有重要意义。

本研究基于1981—2012年的气象数据,利用SPEI方法,对内蒙古各气候区的作物生长季干旱特征及其驱动因子进行分析,并利用2014—2020年的数据对回归模型进行验证,明确各气候区作物生长季干旱高发时间与具体区域,研究干旱规律与本质,对于合理制定应对干旱发生的措施具有实际指导意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况与数据处理

内蒙古位于中国北部,面积118.3×10^4 km^2,约占中国陆地面积的八分之一(图1)。由于内蒙古地区东西跨度较大,涉及的多个气候区具有不同的干旱特征及影响因子。根据联合国防治荒漠化公约提出的全球干旱指数,将内蒙古全区由西向东划分为5个气候区:特干旱、干旱、半干旱、干旱半湿润和湿润半湿润[19]。内蒙古全区冬季较长且寒冷,春季较干旱且有风,降水主要集中在夏季,占年降水量的60%~70%;年平均气温为-4~10 ℃,年平均降水量为50~550 mm,年参照作物需水量为570~1674 mm[20]。

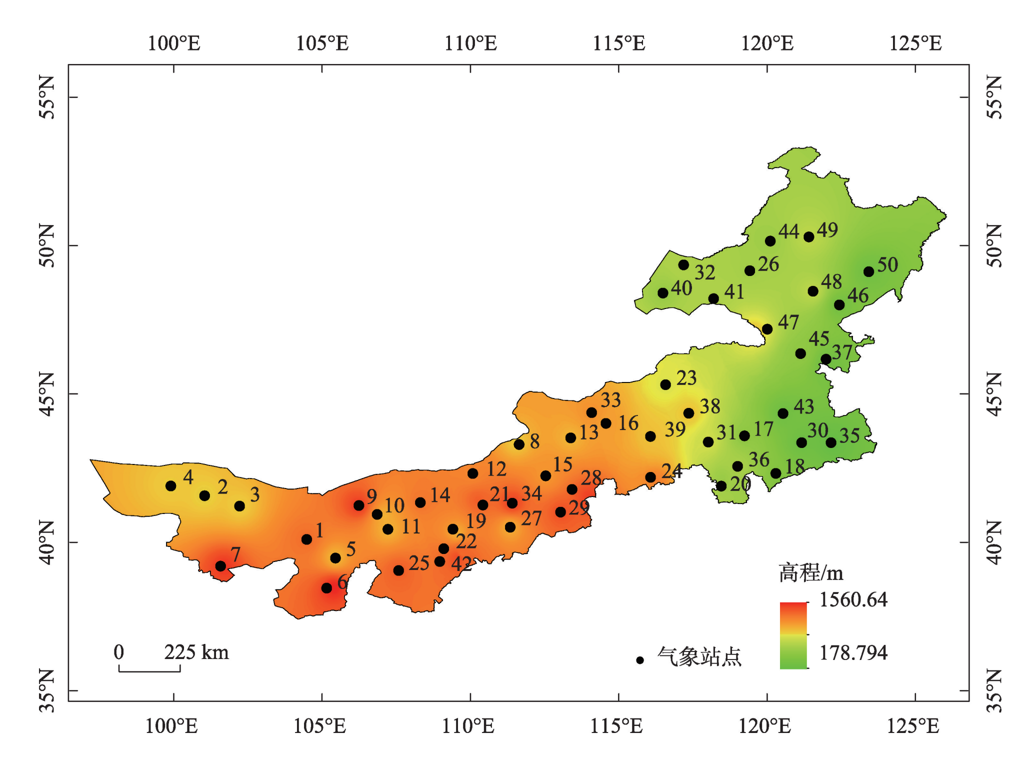
研究数据主要基于50个气象站点1981—2020年逐日平均气温、最高气温、最低气温、平均风速、平均气压、日照时数、平均相对湿度、降水量数据。图1显示了所有气象站点的分布,由于吉柯德、阿拉善右旗、杭锦后旗和伊金霍洛旗4个站点存在气象数据不连续现象,故1981—2012年的干旱分析采用了46个气象站点的数据,由于气象站点数据不全,2014—2020年验证的数据采用了平均分布在全区的20个气象站点的数据,2013年只获取了少数气象站点的数据,因此验证从2014年的数据开始。

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)

(1) 计算潜在蒸散量

SPEI计算原理是利用降水量与蒸散量差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱[18]。用Penman-Monteith公式得到的潜在蒸散不仅考虑温度因子,还加入风速、气压和相对湿度等要素,无论在干旱区还是在湿润区都与实测参考作物蒸散量



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)3333号,对底图边界无修改。下同。

图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of study area

较为符合[14]。因此，本文采用Penman-Monteith公式来计算潜在蒸散量[21]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中：R_n为植被表面净辐射量，W·m^{-2}；G为土壤热通量，W·m^{-2}；Δ为饱和水汽压-温度关系曲线的斜率，kPa·℃$^{-1}$；γ为湿度计常数，kPa·℃$^{-1}$；T为空气平均温度；u_2为地面2 m高处的平均风速，m·s^{-1}；e_s为饱和水汽压，kPa；e_a为实际水气压，kPa。

（2）计算气候水平衡

计算气候水平衡，即逐月降水量与蒸散量的差值D_i：

$$D_i = R_i - \mathrm{PET}_i \quad (2)$$

式中：i为研究时段内月序，随时间递增；R为降水量，mm；PET为潜在蒸散量，mm。

（3）建立不同尺度下气候学意义的水分盈/亏累积序列

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (R_{n-i} - \mathrm{PET}_{n-i}), \quad n \geqslant k \quad (3)$$

式中：k为月时间尺度；n为计算次数。

（4）计算概率加权距(w_s)、概率密度函数[$F(x)$]的参数以及进行累积概率(P)计算，具体计算过程见李伟光等[22]的研究。

（5）计算标准化降水蒸散指数(SPEI)值

对序列进行正态分布标准化，得到对应的SPEI值。

$$\mathrm{SPEI} = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (4)$$

$$w = \sqrt{-2\ln(P)} \quad (5)$$

式中：w为中间参数；当$P \leqslant 0.5$时，$P = 1 - F(x)$；当$P > 0.5$时，$P = 1 - P$；常数项$c_0 = 2.515517$，$c_1 = 0.802853$，$c_2 = 0.010328$，$d_1 = 1.432788$，$d_2 = 0.189269$，$d_3 = 0.001308$。

1.2.2 干旱等级标准　SPEI具有多时间尺度特征，本文计算得到50个站点不同时间尺度的SPEI(包括1、3、6、12个月)，基于SPEI的干旱等级标准[18]如表1所示。

1.2.3 干旱特征及其主导气象因子提取和回归模型验证　本研究分别计算了1981—2020年1、3、6、12个月尺度的SPEI值，用于分析内蒙古地区多时间尺度的干旱特征。5—9月为内蒙古各气候区作物的主要生长季，SPEI-1分析作物生长季的干旱特征简便易行，SPEI-3和SPEI-6考虑了前期的降水补充土壤水分的累积效应，有一定应用价值，而SPEI-12则包含了作物非生育期的降水，故应用效果较差；因此，本研究采用月尺度的干旱特征[23]，对5—9月各月的干旱变化及干旱频率进行分析，以揭示作物生长季内的干旱时空特征。

表1 SPEI干旱等级标准

Tab. 1 SPEI drought rating criteria

干旱等级	SPEI范围
正常	>-0.5
轻旱	-1.0<SPEI≤-0.5
中旱	-1.5<SPEI≤-1.0
重旱	-2.0<SPEI≤-1.5
特旱	≤-2.0

气象因子是影响干旱的主要因素，本研究采用多元线性回归的方法，基于SPSS软件构建SPEI-1与各个气象因子的逐步线性最佳回归模型，确定SPEI-1的最佳模型的气象因子及其通径系数，确定干旱主导因子。

针对所构建的回归模型，采用2014—2020年的气象数据对其进行验证与误差分析，进一步确定其在各气候区的适用性。模型的适用性的判别标准较多，本文以实际计算值与模型估算值之间的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)、平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)、纳什系数(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSE)、决定系数(R^2)和回归系数(Regression Coefficient, b)来表征模型的精确程度，各指标计算方法如下：

$$\mathrm{MRE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{(P_i - O_i)}{O_i} \times 100\% \quad (6)$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})^2\right]^{0.5}\left[\sum_{i=1}^{N}(P_i - \bar{P})^2\right]^{0.5}}\right]^2 \quad (9)$$

$$b=\frac{\sum_{i=1}^{N}O_i\times P_i}{\sum_{i=1}^{N}O_i^2} \tag{10}$$

式中：N为观测值的个数；P_i和O_i分别为第i天的预测值和实测值(i=1, 2, 3, …, N)；$\bar{P}$和$\bar{O}$为预测值和实测值的平均值；R^2和b越接近于1，表示模型模拟效果越好；MRE和RMSE值越小，表示模型模拟效果越好；NSE越接近于1，表示模拟效果越好，接近于0，表示模型效果可行，当NSE远远小于0时，表示模型不可行。

2　结果与分析

2.1　内蒙古地区1981—2020年干旱多时间尺度特征

图2为1981—2020年不同时间尺度SPEI值变化，当时间尺度较短时(1、3、6个月)，SPEI可以很好地表征气象干旱特征，反映区域实际干旱特征。1981—2020年，内蒙古地区整体干旱情况较严重，每年都会有不同程度的干旱发生，且主要集中在5—9月，这与主要作物生长季重合较多，容易使作物生长受到影响。当时间尺度较大时(12个月)，SPEI同样可以反映区域气象干旱特征，1981—2020年，内蒙古地区整体气候经历了干旱由偏轻到偏重再到偏轻的干旱过程，尤其是在1998—2008年，干旱程度较严重，整体SPEI值小于其他时间段。随着时间尺度的增大，SPEI所反映的气候规律会出现一定程度滞后，但规律性更加明显。综上所述，SPEI-1可以反映干旱程度，同时考虑了1个月时长的干旱能够影响作物的生长进程，因此采用SPEI-1值分析5—9月作物主要生长季的干旱情况。

2.2　主要作物生长季干旱特征

作物生长期间月平均SPEI-1值的年际变化如

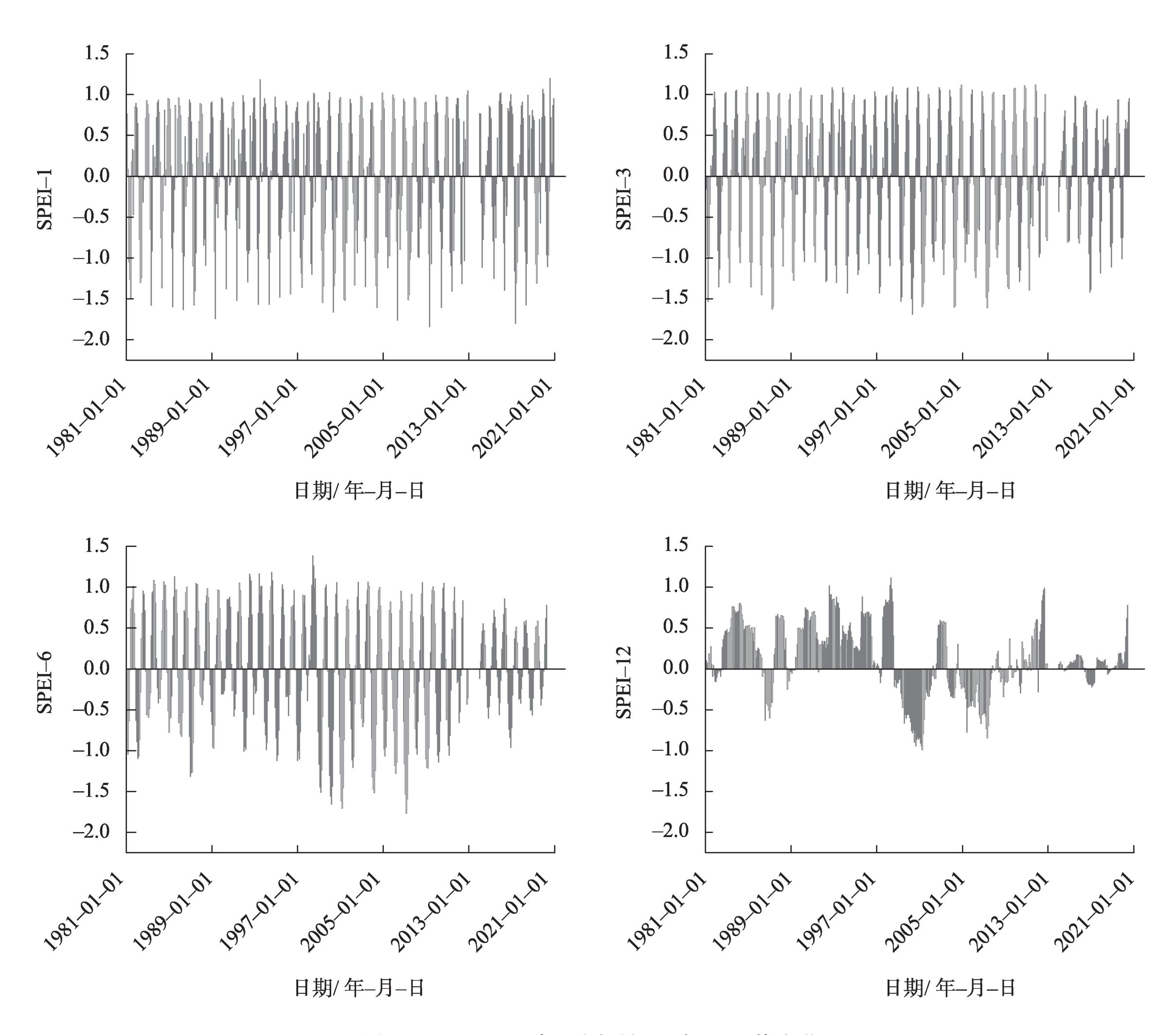


图2　1981—2020年不同时间尺度SPEI值变化

Fig. 2　Change of SPEI values in different time scales from 1981 to 2020

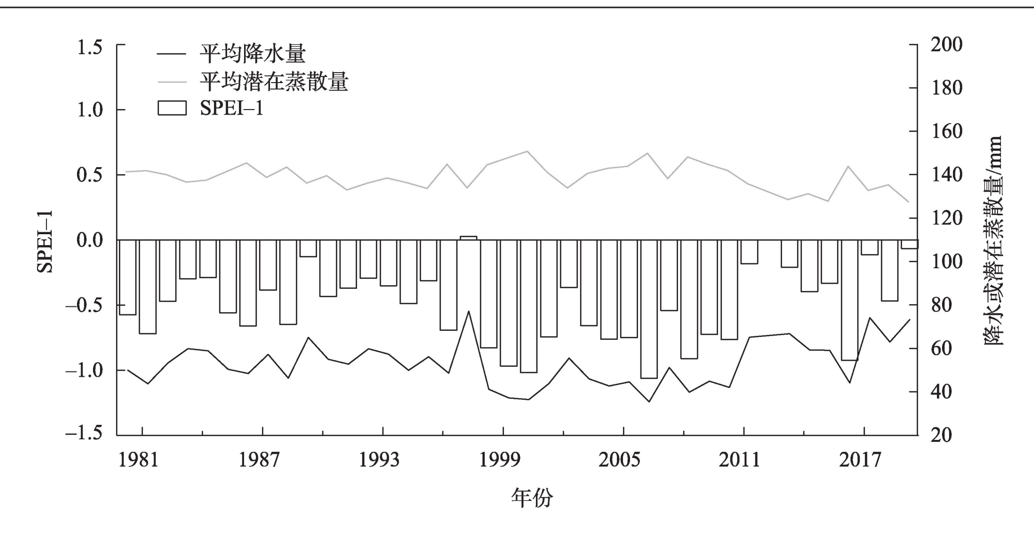


图3 1981—2020年作物生长季平均SPEI-1值、参考蒸散量和降水量

Fig. 3 Change of average SPEI−1, potential evapotranspiration and precipitation in crop growing season from 1981 to 2020

图3。从40 a的SPEI−1值变化来看，其中有19 a的SPEI−1值小于−0.5，即出现干旱情况。尤其是在1999—2011年，除了2003年月平均SPEI−1为−0.36，其余均小于−0.5，同时该时段的降水量明显偏低，而蒸散量偏高。该时段内作物生长阶段月平均降水量较平常年份偏少约11.86 mm，而月平均蒸散量却增加约4.91 mm，因此会引起作物生长季的干旱。2012年后干旱有所缓解，除了2017年出现一定程度的干旱，其余年份平均SPEI−1均大于−0.5。

由图4可知，随着时间推移，干旱面积呈现逐渐减少的趋势，5月和6月的干旱程度显著大于7月、8月和9月。5月干旱面积和程度均最大。在5月，90%的地区存在发生干旱的可能，且大部分地区会发生中旱及重旱，而5月正是作物的出苗期，该阶段的干旱会对作物减产带来较大的危害。从5—9月，特旱和重旱的面积变化逐渐减少；6月随着雨季来临干旱面积明显减少，7月、8月和9月出现特旱的可能性较小；8月开始重旱面积出现的可能性很小，而中轻旱面积与7月差异不大，8月和9月主要以中轻旱为主。

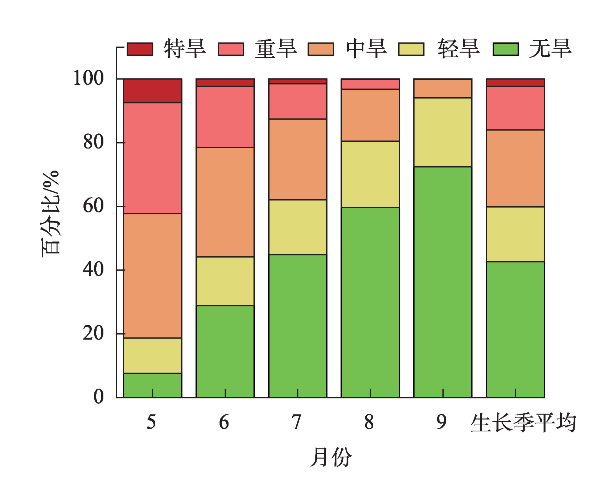


图4 1981—2020年全区作物生长季干旱面积百分比平均值

Fig. 4 Average percentage of drought area in crop growing season from 1981 to 2020

1981—2020年作物生长季内蒙古各气候区每月发生不同等级干旱面积百分比的平均值如图5所示。无干旱情况发生的概率为42%，主要集中在内蒙古东部及中东部偏湿润地区；轻度干旱平均发生概率为17%，多发生于内蒙古的中部、中西部及西部地区；内蒙古特干旱地区发生中度干旱的概率为48%，比湿润半湿润地区高37%；重度干旱发生概率平均为13%，且每个地区发生的概率相差不大，而特大干旱在东部湿润地区发生的概率反而较大，平均为3%。

此外，从6月开始干旱情况有所缓解。由图6可知，各气候区5—9月的降水量为全年最大，但是每月的月平均降水量均小于蒸散量，因此也均会有不同程度的干旱发生。虽然6月降水开始明显增加，但蒸散也是全年最高，水分亏缺严重，因此6月的干旱仍比较严重。7月、8月随着月均降水量与月均蒸散量差值的缩小，干旱情况较5月、6月有所缓解。9月比7月和8月降水蒸散差值变化较小，但干旱面积仍有减少的趋势。

作物生长季内每个月发生干旱(SPEI≤−0.5)频率的空间分布及生长季所有月份平均频率分布如

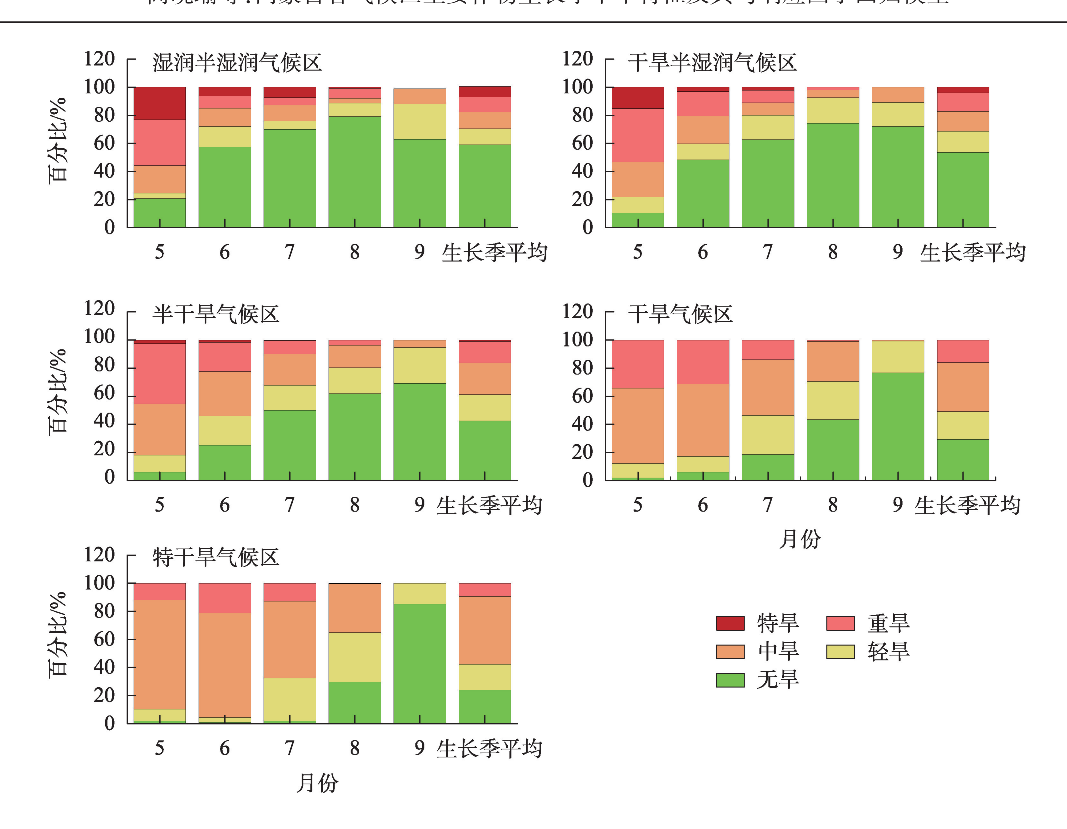


图5　1981—2020年作物生长季内蒙古各区域干旱面积百分比平均值

Fig. 5　Average percentage of drought area in crop growing season from 1981 to 2020 in various regions

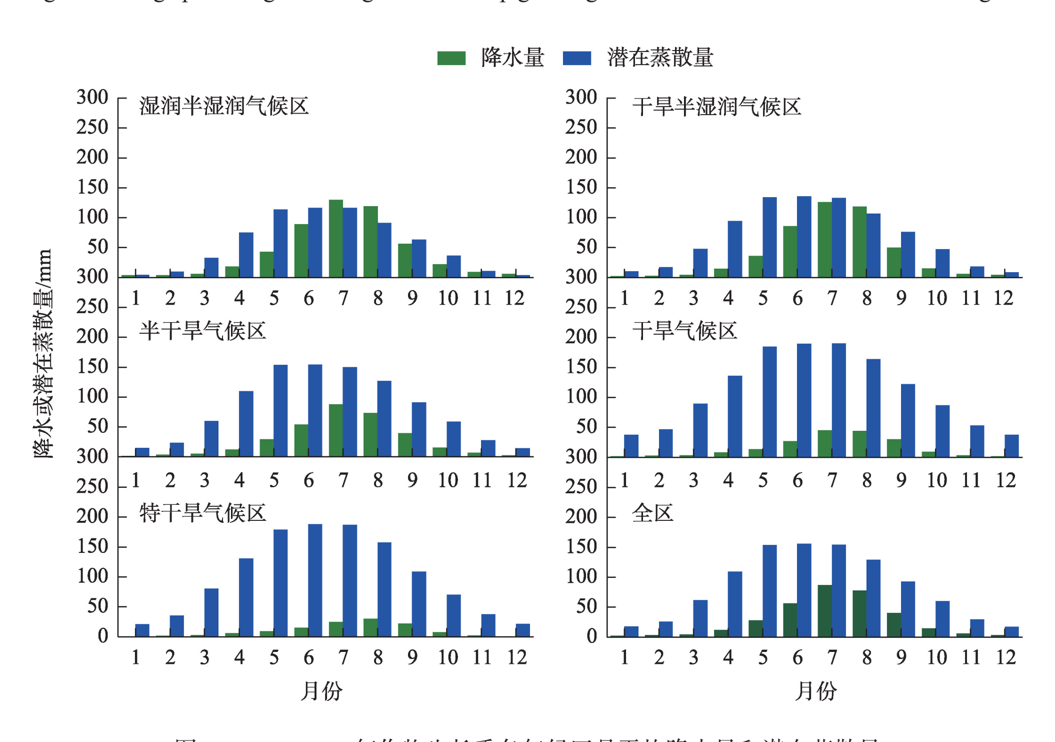


图6　1981—2020年作物生长季各气候区月平均降水量和潜在蒸散量

Fig. 6　Average monthly precipitation and potential evapotranspiration during crop growing season in various climate areas from 1981to 2020

图7所示。内蒙古西部的阿拉善地区、河套灌区,包头东部、中部的朱日和、阿巴嘎旗及东部的呼伦贝尔等地区为干旱发生的主要地区。

另外,5月和6月是作物出苗及拔节的关键时期,该时段除了东北部地区外,其他地区发生干旱的可能性均较大。5月、6月干旱的发生会导致作物

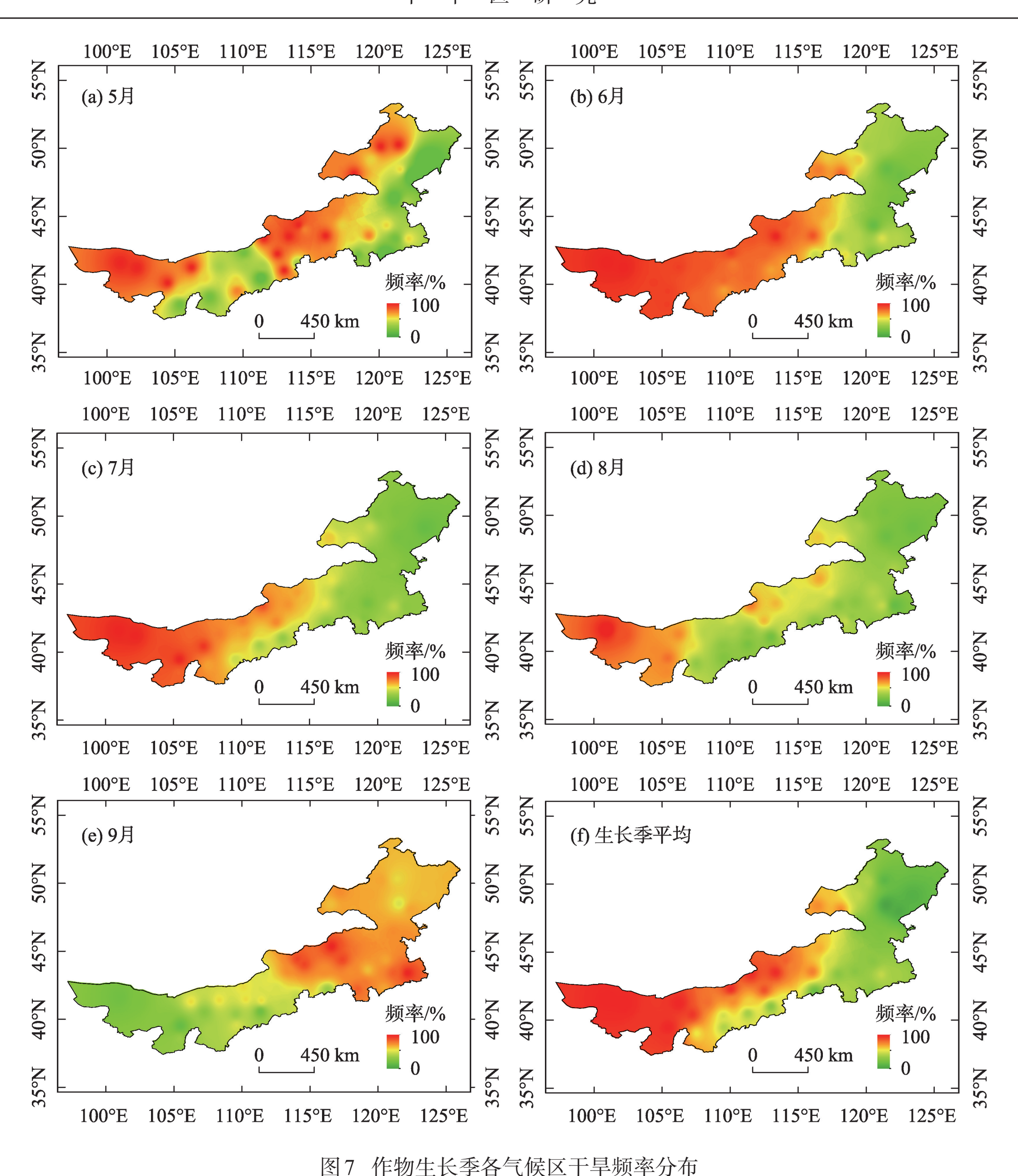


图7 作物生长季各气候区干旱频率分布

Fig. 7 Drought frequency distribution during crop growing season in various climate areas

生长受限。7月、8月、9月也均有大面积干旱发生，主要以轻旱和中旱为主。9月内蒙古东部地区发生中重度干旱的概率增大，但9月处于作物生长末期，对作物影响较小。整体而言，内蒙古地区从西到东，干旱发生的频率逐渐减小。从时间变化来看，作物生长初期干旱情况较严重。

2.3 作物生长季的干旱主导气象因子

采用各月及生长季SPEI-1值进行分析，利用Kolmogorov-Smirnov法进行正态化检验，结果如表2。各气候区各时段的Kolmogorov-Smirnov显著性均大于0.05，因此月尺度SPEI值在各气候区各时段的分布均呈正态分布，对其进行回归分析。回归模型的建立可以采用较少的气象数据估算干旱指数，为农业部门进行干旱评估与预防提供简便的干旱指数估算方法。

基于SPSS分析，对各气候区作物生长季内的月尺度SPEI与对应月份的降水、气温、相对湿度、日照时数、风速等气象因子进行最佳逐步线性回归(表3)。综合各气候区来看，7月、8月、9月的回归模型的决定系数均较高，7月、8月、9月湿润半湿润气候区、干旱半湿润气候区、半干旱气候区、干旱气候区、特干旱气候区及内蒙古全区的R^2平均值分别为：0.862、0.826、0.814、0.877、0.814和0.838，均大于0.8。6月和生长季平均的最佳回归模型的R^2在0.5

表2　SPEI-1正态化检验结果

Tab. 2　SPEI-1 normalization test results

区域	项目	月份					生长季平均
		5	6	7	8	9	
湿润半湿润区	Kolmogorov-Smirnov 显著性	0.605	0.990	0.566	0.945	0.620	0.523
	是否满足正态分布	是	是	是	是	是	是
干旱半湿润区	Kolmogorov-Smirnov 显著性	0.154	0.692	0.502	0.740	0.801	0.944
	是否满足正态分布	是	是	是	是	是	是
半干旱区	Kolmogorov-Smirnov 显著性	0.724	0.760	0.56	0.676	0.225	0.988
	是否满足正态分布	是	是	是	是	是	是
干旱区	Kolmogorov-Smirnov 显著性	0.666	0.697	0.350	0.433	0.666	0.934
	是否满足正态分布	是	是	是	是	是	是
特旱区	Kolmogorov-Smirnov 显著性	0.830	0.911	0.963	0.251	0.101	0.420
	是否满足正态分布	是	是	是	是	是	是

左右,仅5月R^2较低。

表3中给出了不同影响因子的标准系数,不同月份内主要影响SPEI-1值的气象因子不尽相同,从全区平均来看,5月和6月作用比较大的为最低温度和相对湿度;而7月、8月、9月的降水对SPEI-1值影响较大,标准化系数分别为0.936、0.901和0.894。基于最佳逐步线性回归及考虑相对湿度与降水的相关性,生长季平均作用最大的为相对湿度,标准化系数为0.798。在5月、6月及生长季平均,SPEI-1与日照时数也有直接关系。此外,5月、6月、8月及生长季平均的SPEI-1值与温度也有一定的直接关系,但最高、最低及平均气温的影响作用不同,影响较大的均是最低气温。因此,影响作物生长季干旱情况的主要气象因子有相对湿度、降水和气温。

从各气候区来看,各气候区干旱的主导气象因子也各不相同。在湿润半湿润气候区、干旱半湿润气候区、半干旱气候区、干旱气候区和特干旱气候区,5月直接影响SPEI-1的气象因子分别为最低温度和降水,最低温度、风速和气压,风速、相对湿度和日照时数,最低温度,最低温度、风速和相对湿度。因此,5月影响SPEI-1最主要的气象因子为最低温度。

由于月份最佳回归模型所包含的气象因子的显著性均小于0.05,在解释各个模型时都应当保留,且均为各月干旱的主导气象因子。

各气候区及全区平均5—9月及生长季平均值线性回归方程如表4所示。

综上所述,气温在生育期大部分月份都会作用于SPEI-1,因此近年来气温的上升会对作物生长季的干旱有直接要影响。虽然7月、8月、9月降水对SPEI-1的作用大于气温,但仍需考虑温度升高引起的干旱。

2.4　各气候区回归模型验证

采用2014—2020年的SPEI-1计算值和对应的气象数据,对上述已确定的模型进行验证,图8对比了SPEI-1的估算值与计算值。结果显示,各气候区估算值和计算值的对应值均匀地分布在1:1线两侧,说明回归模型均具有较高的精度,能够较好地利用部分气象数据得到月SPEI值。表5为图8中各图的RMSE、NSE、R^2、b、MRE。图8和表5均反映出全区的回归模型相比各气候区的回归模型,精度较低;如湿润半湿润、干旱半湿润、半干旱、干旱、特干旱气候区及全区7月的NSE分别为:0.77、0.91、0.91、0.84、0.84和0.82,说明全区的回归模型不能很精确地估算各气候区的干旱。

对比同一气候区各月的回归模型,5月和生长季平均的模型估算效果相对其他月份较低,如干旱半湿润气候区5月、6月、7月、8月、9月及生长季平均的NSE分别为:0.05、0.61、0.91、0.97、0.93和0.51。主要因为5月的干旱较严重,影响因素较多,因此模拟精度较低。生长季平均的干旱特征与各月的干旱特征有明显不同,因此生长季平均的回归模型不能准确估算各月的干旱指数。

3　讨　论

本文选用基于Penman-Monteith公式的SPEI值,分析了内蒙古各气候区月尺度下的干旱特征,阐明了内蒙古近40 a的干旱变化规律。与Liu等[24]

表3 各气候区作物生长季5—9月最佳逐步线性回归模型与回归系数

Tab. 3 Regression coefficient of the best stepwise linear regression model from May to September of crop growing season in various climate areas

气候区	月份	模型变量	R^2	未标准化系数	标准化系数	显著性
湿润半湿润气候区	5	(常量)	0.148	-1.875		0
		T_{min}		0.096	0.34	0
		P		0.006	0.237	0.005
	6	(常量)	0.635	-0.012		0.995
		RHU		0.063	0.319	0
		SSD		-0.166	-0.206	0.02
		T_{min}		0.199	0.39	0
		T_{max}		-0.21	-0.449	0
	7	(常量)	0.879	-1.962		0
		P		0.022	0.937	0
	8	(常量)	0.861	-1.111		0
		P		0.021	0.921	0
		T_{max}		-0.027	-0.076	0.024
	9	(常量)	0.845	-0.939		0
		P		0.026	0.919	0
	生长季平均	(常量)	0.72	3.692		0.023
		SSD		-0.158	-0.243	0.001
		RHU		0.043	0.251	0.001
		T_{min}		0.469	1.514	0
		T_{mean}		-0.585	-1.55	0
		WS		-0.369	-0.24	0.003
干旱半湿润气候区	5	(常量)	0.272	24.174		0.003
		T_{min}		0.223	0.664	0
		WS		-0.588	-0.294	0.001
		APS		-0.027	-0.463	0.002
	6	(常量)	0.71	-2.524		0.222
		RHU		0.084	0.531	0
		T_{min}		0.234	0.445	0
		T_{max}		-0.231	-0.481	0
	7	(常量)	0.806	-1.431		0
		P		0.017	0.882	0
		T_{min}		-0.03	-0.092	0.048
	8	(常量)	0.872	-1.668		0
		P		0.021	0.934	0
	9	(常量)	0.801	-1.108		0
		P		0.03	0.895	0
	生长季平均	(常量)	0.726	10.932		0.082
		RHU		0.069	0.496	0
		T_{min}		0.517	1.641	0
		T_{mean}		-0.522	-1.243	0
		APS		-0.013	-0.276	0.041

注：P表示降水；T_{mean}表示平均气温；T_{max}表示最高气温；T_{min}表示最低气温；SSD表示日照时数；WS表示风速；RHU表示相对湿度；APS表示气压。下同。

续表3

气候区	月份	模型变量	R^2	未标准化系数	标准化系数	显著性
半干旱气候区	5	(常量)	0.097	0.105		0.643
		WS		−0.191	−0.251	0
		RHU		−0.011	−0.161	0
		SSD		−0.057	−0.114	0.002
	6	(常量)	0.543	0.896		0
		RHU		0.047	0.447	0
		WS		−0.252	−0.167	0
		T_{max}		−0.231	−0.586	0
		T_{min}		0.188	0.481	0.036
		SSD		−0.011	−0.049	0
	7	(常量)	0.864	−1.938		0
		P		0.021	0.93	0
	8	(常量)	0.794	−1.574		0
		P		0.022	0.891	0
	9	(常量)	0.785	−0.812		0
		P		0.024	0.882	0
		WS		−0.066	−0.058	0
	生长季平均	(常量)	0.605	1.616		0
		RHU		0.055	0.638	0
		WS		−0.21	−0.203	0
		APS		−0.003	−0.23	0
		T_{min}		0.137	0.532	0
		T_{max}		−0.139	−0.481	0
		SSD		−0.043	−0.101	0
干旱气候区	5	(常量)	0.02	−1.535		0
		Tmin		0.031	0.14	0.036
	6	(常量)	0.511	0.762		0.133
		RHU		0.029	0.45	0
		SSD		−0.053	−0.115	0.04
		T_{max}		−0.163	−0.639	0
		T_{min}		0.132	0.485	0
	7	(常量)	0.908	−3.557		0
		P		0.021	0.945	0
		T_{min}		0.081	0.073	0.001
		WS		0.084	0.046	0.048
	8	(常量)	0.861	3.789		0
		P		0.022	0.926	0
		APS		−0.006	−0.071	0.005
	9	(常量)	0.862	−0.623		0
		P		0.021	0.928	0
		WS		−0.047	−0.055	0.03
	生长季平均	(常量)	0.504	0.593		0.167
		RHU		0.026	0.519	0
		SSD		−0.05	−0.094	0.08
		T_{max}		−0.138	−0.668	0
		T_{min}		0.112	0.496	0

续表3

气候区	月份	模型变量	R^2	未标准化系数	标准化系数	显著性
特干旱气候区	5	（常量）	0.097	−1.186		0
		T_{min}		0.061	0.256	0.001
		WS		−0.148	−0.317	0
		RHU		−0.008	−0.173	0.037
	6	（常量）	0.543	−5.092		0
		RHU		0.022	0.574	0
		APS		0.004	0.375	0
		SSD		−0.059	−0.21	0.017
	7	（常量）	0.864	−1.843		0
		P		0.02	0.955	0
	8	（常量）	0.794	−1.537		0
		P		0.023	0.949	0
	9	（常量）	0.785	1.957		0.59
		P		0.024	0.837	0
		APS		−0.004	−0.144	0
		T_{min}		0.038	0.083	0.034
	生长季平均	（常量）	0.605	−2.776		0
		RHU		0.016	0.531	0
		SSD		−0.119	−0.441	0
		APS		0.003	0.362	0
全区	5	（常量）	0.125	1.336		0
		T_{min}		0.089	0.553	0
		APS		−0.001	−0.084	0.004
		WS		−0.12	−0.182	0
		RHU		−0.014	−0.262	0
		T_{mean}		−0.073	−0.405	0
		SSD		−0.049	−0.107	0.001
	6	（常量）	0.478	0.241		0.561
		RHU		0.041	0.595	0
		T_{min}		0.183	0.601	0
		T_{max}		−0.158	−0.512	0
		SSD		−0.02	−0.07	0
		APS		−0.001	−0.062	0.037
	7	（常量）	0.877	−1.958		0
		P		0.021	0.936	0
	8	（常量）	0.834	−0.281		0.337
		P		0.022	0.901	0
		APS		−0.002	−0.057	0
		T_{min}		0.016	0.034	0.002
	9	（常量）	0.803	−0.1		0.59
		P		0.024	0.894	0
		APS		−0.001	−0.048	0
		WS		−0.045	−0.043	0
	生长季平均	（常量）	0.529	0.156		0.55
		RHU		0.039	0.798	0
		T_{min}		0.103	0.51	0
		APS		−0.002	−0.173	0
		SSD		−0.057	−0.141	0
		T_{max}		−0.057	−0.266	0

表4　SPEI-1值与主导气象因子回归方程

Tab. 4　Regression equation between SPEI-1 value and dominant meteorological factors

气候区	SPEI-1值与主导气象因子回归方程	气候区	SPEI-1值与主导气象因子回归方程
湿润半湿润气候区	SPEI-1$_5$=−1.875+0.096T_{min}+0.006P	干旱气候区	SPEI-1$_5$=−1.535+0.031T_{min}
	SPEI-1$_6$=−0.012+0.063RHU−0.166SSD+0.199T_{min}−0.210T_{max}		SPEI-1$_6$=0.762+0.029 RHU−0.053SSD−0.163T_{max}+0.132T_{min}
	SPEI-1$_7$=−1.962+0.022P		SPEI-1$_7$=−3.557+0.021 P+0.081 T_{min}+0.084WS
	SPEI-1$_8$=−1.111+0.021P−0.027T_{max}		SPEI-1$_8$=3.789+0.022 P−0.006APS
	SPEI-1$_9$=−0.939+0.026P		SPEI-1$_9$=−0.623+0.021P−0.047WS
	SPEI-1$_{mean}$=3.692−0.158SSD+0.043RHU+0.469T_{min}−0.585T_{mean}−0.369WS		SPEI-1$_{mean}$=0.593+0.026RHU−0.050SSD−0.138T_{max}+0.112T_{min}
干旱半湿润气候区	SPEI-1$_5$=24.174+0.223T_{min}−0.588WS−0.027APS	特干旱气候区	SPEI-1$_5$=−1.186+0.061T_{min}−0.148WS−0.008RHU
	SPEI-1$_6$=−2.524+0.084RHU+0.234T_{min}−0.231T_{max}		SPEI-1$_6$=−5.092+0.022 RHU+0.004APS−0.059SSD
	SPEI-1$_7$=−1.431+0.017P−0.030T_{min}		SPEI-1$_7$=−1.843+0.020 P
	SPEI-1$_8$=−1.668+0.021P		SPEI-1$_8$=−1.537+0.023 P
	SPEI-1$_9$=−1.108+0.030P		SPEI-1$_9$=1.957+0.024P−0.004APS+0.038T_{min}
	SPEI-1$_{mean}$=10.932+0.069RHU+0.517T_{min}−0.522T_{mean}−0.013APS		SPEI-1$_{mean}$=−2.776+0.016RHU−0.119SSD+0.003APS
半干旱气候区	SPEI-1$_5$=0.105−0.191WS−0.011RHU−0.057SSD	全区	SPEI-1$_5$=1.336+0.089T_{min}−0.01APS−0.12WS−0.014RHU−0.073T_{mean}+0.049SSD
	SPEI-1$_6$=0.896+0.047RHU−0.252WS−0.231T_{max}+0.188T_{min}−0.011SSD		SPEI-1$_6$=0.24+0.041RHU+0.183T_{min}−0.158T_{max}−0.02SSD−0.001APS
	SPEI-1$_7$=−1.938+0.021P		SPEI-1$_7$=−1.958+0.021P
	SPEI-1$_8$=−1.574+0.022P		SPEI-1$_8$=−0.281+0.022P−0.002APS+0.016T_{min}
	SPEI-1$_9$=−0.812+0.024P−0.066WS		SPEI-1$_9$=−0.1+0.024P−0.001APS−0.045WS
	SPEI-1$_{mean}$=1.616+0.055RHU−0.210WS−0.003APS+0.137T_{min}−0.139T_{max}−0.043SSD		SPEI-1$_{mean}$=0.156+0.039RHU+0.103T_{min}−0.002APS−0.057SSD−0.057T_{max}

的结论一致，气候变化大背景下，内蒙古在2000—2011年SPEI值较前期偏低，表明这10 a为干旱期。另外，Huang等[25]的研究认为，内蒙古地区主要呈现降水量减少的趋势尤其是中东部地区，且会影响该地区的水资源问题。

针对主要作物生长季（5—9月）的干旱进行分析，40 a来主要作物生长季SPEI值小于0.5的有19 a，也就是有一半左右的年份会在生长季出现干旱。作物生长季干旱面积百分比显示，内蒙古地区作物生长季干旱高发时段主要集中在5—6月，且以中重旱为主，由于5月、6月降水较少，而蒸散量却很大，与王潇潇等[20]的结论一致。

内蒙古地区作物生长季干旱高发地区随着月份的变化有所差异，整个生长季平均来看，主要集中在中西部及西部干旱半干旱气候区，如张煦庭等[18]和那音太[26]研究显示，内蒙古西部地区降水较少但变异程度大，同时地表蒸散量大，更易出现轻旱和中旱；内蒙古东部地区虽然降水量较大但是参考作物蒸散量也同时上升[27]，因此，如图6中显示东部及中东部地区发生特旱的概率会高一些，周扬等[5]的研究有类似的结论。不同气候区呈现不同的干旱特点与不同的气象主导因子，在不同气候区如何应对和预测干旱发生，还需作后续研究。

目前，关于内蒙古各气候区的干旱驱动因子研究较少，多集中于大尺度的气象因子分析，如王潇潇等[20]分析了内蒙古地区气象因子的时空变化，发现了温度与湿度的整体趋势，但不能精确刻画干旱，无法直接用于指导农业生产。本研究发现，内蒙古地区不同气候区作物生长季内不同月份主导干旱的气象因子并不相同，降水和相对湿度是最主要的主导因子；同一时段不同的气候区也表现出不一样的规律，这些研究成果可以更加准确地指导当地的农业生产。由于降水和相对湿度存在极高的相关性，所以在模型回归过程中进行了变量去除，所以回归公式中降水和相对湿度并未同时出现[23]。

此外，本研究主要针对气候干旱与气象因子的

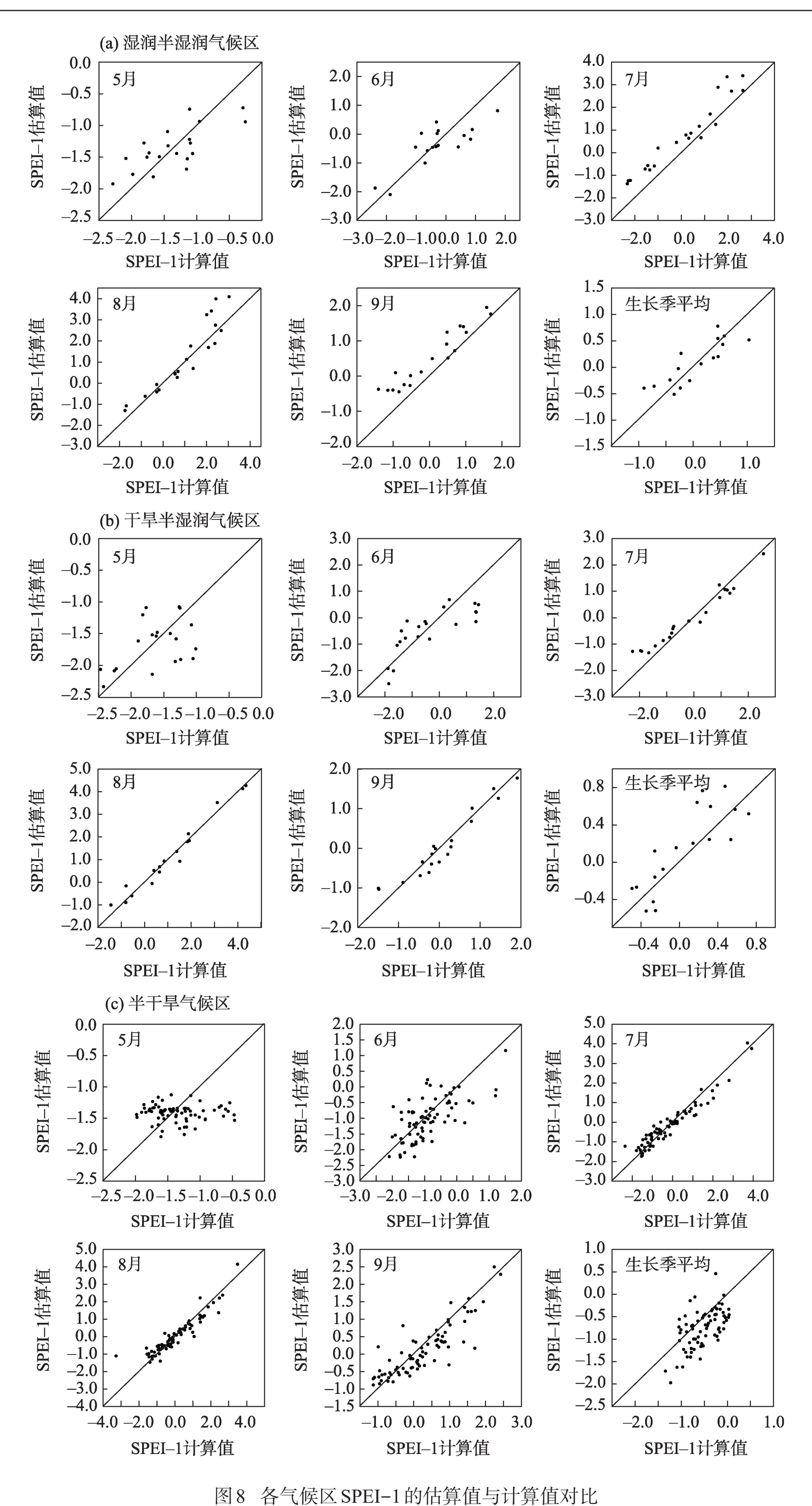


图8 各气候区SPEI–1的估算值与计算值对比

Fig. 8 Comparison of predicted and calculated values of SPEI–1 in various climatic regions

续图8

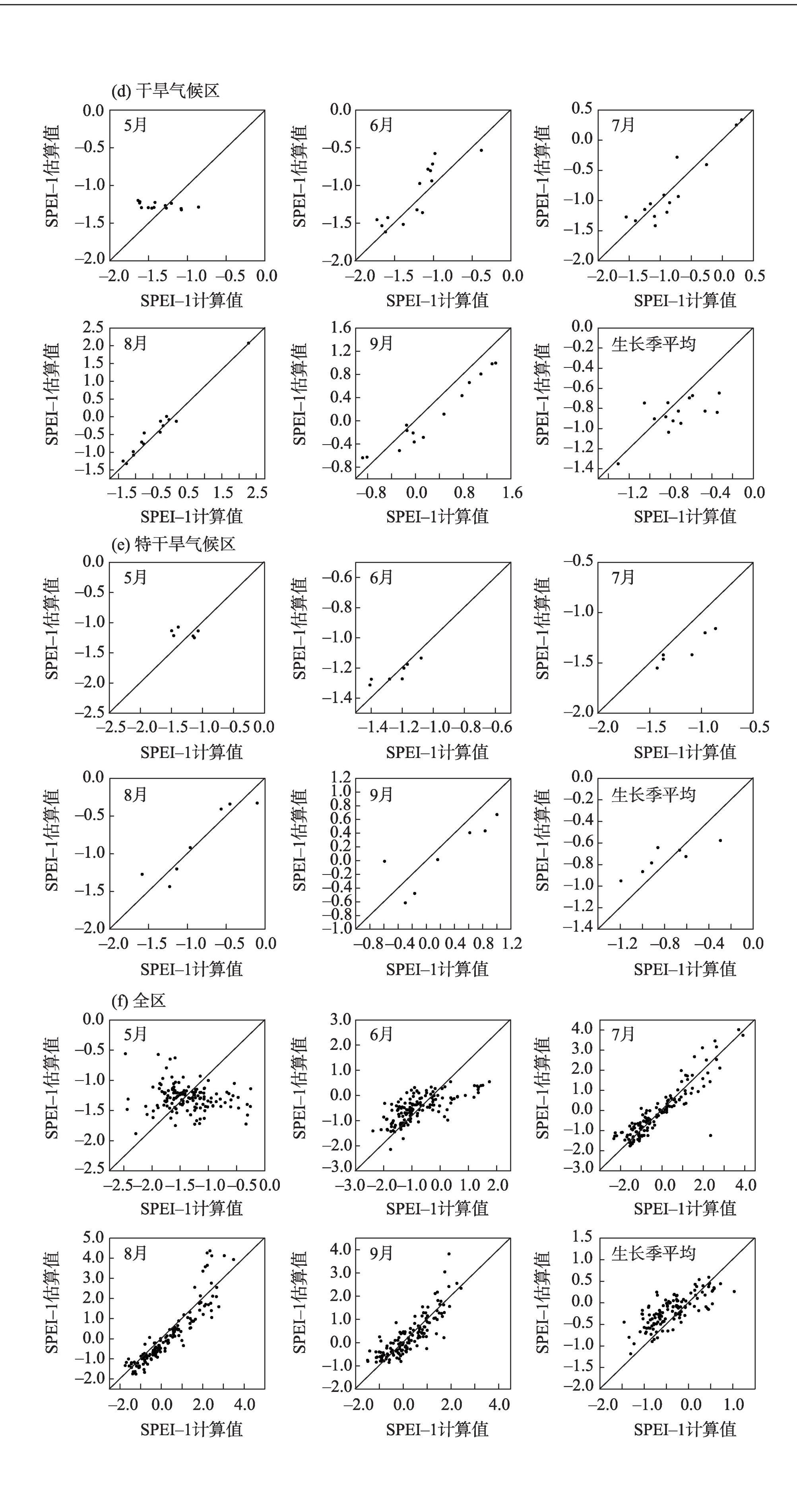

(d) 干旱气候区
5月
6月
7月
8月
9月
生长季平均
(e) 特干旱气候区
5月
6月
7月
8月
9月
生长季平均
(f) 全区
5月
6月
7月
8月
9月
生长季平均
SPEI-1估算值
SPEI-1计算值

表5 各气候区回归模型误差

Tab. 5 Errors of regression models in various climate areas

气候区	月份	RMSE	NSE	R^2	b	MRE
湿润半湿润气候区	5	0.36	0.52	0.53	0.93	19%
	6	0.57	0.68	0.65	0.65	-11%
	7	0.77	0.77	0.93	0.95	-0.1%
	8	0.67	0.79	0.86	1.12	0.4%
	9	0.54	0.66	0.92	0.84	11%
	生长季	0.29	0.69	0.7	0.66	-11%
干旱半湿润气候区	5	0.43	0.05	0.21	0.98	8%
	6	0.73	0.61	0.63	0.64	-27%
	7	0.39	0.91	0.96	0.76	-32%
	8	0.29	0.97	0.97	0.98	-12%
	9	0.24	0.93	0.93	0.89	-15%
	生长季	0.26	0.51	0.68	0.99	-6%
半干旱气候区	5	0.41	-0.17	0	0.97	17%
	6	0.59	0.36	0.44	0.92	49%
	7	0.37	0.91	0.92	0.85	-25%
	8	0.44	0.86	0.86	0.80	-19%
	9	0.45	0.72	0.74	0.71	-15%
	生长季	0.43	-0.36	0.42	1.23	31%
干旱气候区	5	0.27	-0.34	0.42	0.91	-3%
	6	0.21	0.62	0.80	0.92	-7%
	7	0.21	0.84	0.86	1.00	8%
	8	0.15	0.97	0.97	0.93	-11%
	9	0.28	0.84	0.94	0.72	-7%
	生长季	0.23	0.21	0.54	1.09	28%
特干旱气候区	5	0.23	0.83	0.85	0.90	-6%
	6	0.07	0.63	0.77	0.99	-0.4%
	7	0.21	0.84	0.95	1.14	15%
	8	0.18	0.85	0.85	0.95	25%
	9	0.35	0.61	0.69	0.6	-1%
	生长季	0.18	0.55	0.79	0.88	6%
全区	5	0.53	-0.42	0.01	0.85	17%
	6	0.68	0.38	0.21	0.53	-39%
	7	0.54	0.82	0.83	0.86	-18%
	8	0.59	0.78	0.85	1.00	-5%
	9	0.48	0.69	0.33	0.86	-10%
	生长季	0.38	0.42	0.2	0.51	-41%

关系，旨在揭示各气候区的气候干旱，为农业干旱灾害预防及合理的灌溉等措施提供科学依据，接下来的研究中应将气候干旱与土壤干旱相结合向农业干旱过渡，以实现更好地指导农业生产。

4 结 论

（1）1981—2020年内蒙古经历了干旱程度先偏轻到偏重又偏轻的过程，1998—2008年干旱情况较为严重，其余年份干旱情况较轻。

（2）内蒙古各气候区作物生长季内5月的干旱面积最大和程度最重，90%的地区可能发生干旱，且大部分地区会发生中旱及重旱，8月和9月主要以中轻旱为主。内蒙古西部特干旱气候区发生中度干旱的概率为45%，比东部湿润半湿润气候区高32%；

重度干旱平均发生概率为14%,每个地区发生的概率相差不大,而特大干旱反而在东部湿润地区发生的概率较大,平均为3%。

(3) 内蒙古作物生长季干旱主导因子随着时间的变化而不同。5月、6月、7月、8月、9月和生长季平均的干旱主导因子分别为:最低温度、最低温度、降水量、降水量、降水量和最低温度;因此,降水和最低温度是作物生长季最主要的干旱影响因子。从不同空间分布来看,各气候区干旱的主导气象因子也各不相同。如5月从西向东5个气候区直接影响SPEI-1的气象因子分别为:最低温度和降水,最低温度、风速和气压,风速、相对湿度和日照时数,最低温度,最低温度、风速和相对湿度,但5月最主要的干旱主导气象因子为最低温度。

(4) 各气候区回归模型通过2014—2020年数据的验证,除了全区的模型及各气候区5月和生长季的模型外,其余均具有较高的估算精度,能够为不同气候区气象数据缺失情况下的干旱分析提供理论支持。

参考文献(References):

[1] Dai A, Trenberth K E, Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6): 1117-1130.

[2] 郑大玮, 李茂松, 霍治国. 农业灾害与减灾对策[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013. [Zheng Dawei, Li Maosong, Huo Zhiguo. Agricultural Disasters and Countermeasures for Disaster Reduction[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013.]

[3] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439. [Ma Zhuguo, Fu Congbin. Characteristics of aridification over northern China during 1951-2004[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(20): 2429-2439.]

[4] 王娜, 王靖, 冯利平, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作区采用"两晚"技术的产量效应模拟分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(5): 611-618. [Wang Na, Wang Jing, Feng Liping, et al. Modeling the impact of "Double-Delay" technology on yield of wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(5): 611-618.]

[5] 周扬, 李宁, 吉中会, 等. 基于SPI 指数的 1981—2010年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1694-1706. [Zhou Yang, Li Ning, Ji Zhonghui, et al. Temporal and spatial patterns of droughts based on standard precipitation index (SPI) in Inner Mongolia during 1981-2010[J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(10): 1694-1706.]

[6] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 华北平原冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1068-1072. [Liu Ronghua, Zhu Zixi, Fang Wensong, et al. Risk regionalization of yield loss caused by drought for winter wheat in North China Plain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(9): 1068-1072.]

[7] Palmer W C. Meteorology Drought[R]. Washington: No.30 US Department of Commerce, Weather Bureau Washington, 1965.]

[8] 周丹, 张勃, 罗静, 等. 基于SPEI 的华北地区近 50 年干旱发生强度的特征及成因分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 192-202. [Zhou Dan, Zhang Bo, Luo Jing, et al. SPEI-based intensity characteristics and cause analysis of drought in North China during recent 50 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 192-202.]

[9] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(3): 429-438.

[10] 周磊, 武建军, 吕爱峰, 等. 华北不同地表覆盖类型区干旱演变特征[J]. 地理研究, 2012, 31(4): 597-607. [Zhou Lei, Wu Jianjun, Lv Aifeng, et al. Drought evolution of different land cover regions in North China[J]. Geographical Research, 2012, 31(4): 597-607.]

[11] 吴英杰, 李玮, 王文君, 等. 基于降水量距平百分率的内蒙古地区干旱特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 943-952. [Wu Yingjie, Li Wei, Wang Wenjun, et al. Drought characteristics in Inner Mongolia based on precipitation anomaly percentage[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 943-952.]

[12] 朱烨, 靳鑫桐, 刘懿, 等. 基于短时间尺度自适应帕尔默干旱指数的中国干旱演变特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 124-130. [Zhu Ye, Jin Xintong, Liu Yi, et al. Drought characteristics analysis in China based on self-calibrating Palmer drought severity index in a short time scale[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 124-130.]

[13] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431. [Wang Lin, Chen Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423-431.]

[14] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[15] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的SPEI对中国干湿变化的分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 23-36. [Liu Ke, Jiang Dabang. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 23-36.]

[16] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(5): 617-625. [Zhuang Shaowei, Zuo Hongchao, Ren Pengcheng, et al. Application of stan-

dardized precipitation evapotranspiration index in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(5): 617–625.]

[17] 刘宇, 李雯晴, 刘招, 等. 基于SPEI渭北黄土台塬区干旱时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 109–117. [Liu Yu, Li Wenqing, Liu Zhao, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of the drought in Weibei loess tableland area based on SPEI[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 109–117.]

[18] 张煦庭, 潘学标, 徐琳, 等. 基于降水蒸发指数的1960—2015年内蒙古干旱时空特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 190–199. [Zhang Xuting, Pan Xuebiao, Xu Lin, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Inner Mongolia during 1960–2015[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 190–199.]

[19] 任晓东. 内蒙古不同气候区ET_0估算方法(FAO-PM温度法和Hargreaves-Samani法)的适用性评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014. [Ren Xiaodong. Assessment of ET_0 Estimation Methods (FAO-PM Temperature and Hargreaves-Samani Methods) in Different Climates of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.]

[20] 王潇潇, 潘学标, 顾生浩, 等. 内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 142–152. [Wang Xiaoxiao, Pan Xuebiao, Gu Shenghao, et al. Trend in reference crop evapotranspiration and meteorological factors affecting trends in Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(Suppl.1): 142–152.]

[21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Roma Italy: FAO Irrigation and Drainage, 1998: 56.

[22] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643–649. [Li Weiguang, Yi Xue, Hou Meiting, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 643–649.]

[23] 李崇瑞, 游松财, 武永峰. 东北地区干旱特征与春玉米生长季干旱主导气象因子[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 97–106. [Li Chongrui, You Songcai, Wu Yongfeng. Drought characteristics and dominant meteorological factors driving drought in spring maize growing season in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 97–106.]

[24] Liu S, Kang W, Wang T. Drought variability in Inner Mongolia of northern China during 1960–2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2): 1–14.

[25] Huang J, Sun S L, Xue Y, et al. Changing characteristics of precipitation during 1960–2012 in Inner Mongolia, northern China[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2015, 127(3): 257–271.

[26] 那音太. 基于SPI指数的近50 a内蒙古地区干旱特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 161–166. [Na Yintai. Drought characteristics in Inner Mongolia based on the SPI index in the last 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(5): 161–166.]

[27] 李秋月, 潘学标, 王丽, 等. 内蒙古地区气候资源变化趋势分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(增刊): 19–23. [Li Qiuyue, Pan Xuebiao, Wang Li, et al. Analysis of the trend of climate resources change in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(Suppl.): 19–23.]

Drought characteristics and regression models of drought characteristics and response factors of various climatic areas in Inner Mongolia during main crop growing season

GAO Xiaoyu[1], TANG Pengcheng[2], ZHANG Sha[1], QU Zhongyi[1], YANG Wei[1]

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: With the foundation of global climate change in recent years, droughts in various climatic areas in Inner Mongolia may bring unpredictable disaster risks to local agricultural production. The whole region was divided into five climatic areas, and monthly data was received from 46 meteorological stations from 1981 to 2012. Twenty meteorological stations from 2014 to 2020 were selected to calculate the different time scales of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) using precipitation and reference evapotranspiration from the Penman-Monteith method to reveal the drought characteristics and its dominant meteorological factors during the crop growing season (May-September) in Inner Mongolia. A monthly drought during the crop growing season was revealed. The high-incidence month and region of drought in the growing season in various climatic areas were identified by the SPEI of a 1−month scale, and a stepwise linear regression method was selected and verified to extract the dominant meteorological factors driving the drought in each month and the whole growing season in various climatic areas. Results indicated that the following: (1) from the interannual changes, the drought from 1998 to 2008 was more serious, and the drought in other years was less serious. (2) The largest drought area and degree appeared in May during the crop growing season. The probability of moderate drought in the moist and semi-humid area was 37% higher compared to the hyper-arid area, while the extreme drought probably occurred in the moist and semi-humid area and dry and semi-humid area. (3) Dominant meteorological factors driving the drought varied in the crop growth period of various climatic areas in Inner Mongolia. Precipitation and a minimum temperature were the main impact factors for a drought in the crop growing season. (4) Using limited meteorological data, the regression models in each climate region performance well can be used to estimate the monthly SPEI. The results provide a theoretical basis for scientific evaluation of drought characteristics in the spring maize growing season and formulates reasonable measures of response to the drought.

Keywords: climate areas; drought characteristics; standardized precipitation evapotranspiration index; meteorological factors; regression models; growing season of crops; Inner Mongolia